

## نمذجة نظام قيادة لمحرك تحريضي ثلاثي الطور باستخدام الحقل الموجه

الدكتور محمد مرهج\*

(تاريخ الإيداع 7 / 1 / 2015. قُبِلَ للنشر في 22 / 3 / 2015)

### □ ملخص □

تم في هذا البحث بناء نموذج لنظام قيادة كهربائي يستخدم محرك تحريضي ثلاثي الطور ذي دوائر مقصور باستخدام طريقة الحقل الموجه و ذلك للتحكم بكل من السرعة، الفيض و التيار. تم استخدام منظمات تناسبية تكاملية في دائرة التحكم، أما نموذج الآلة فتم تشكيله بالاعتماد على معادلات الآلة التحريضية المكتوبة في الإحداثيات الثابتة. لإتمام عملية التحكم دون قياس فيض الدائر تم بناء نموذج للفيض انطلاقاً من القيم المقاسة لكل من تيار الثابت وسرعة الدائر التي يمكن قياسها بشكل مباشر وتم التحقق من النموذج بنتائج تم الحصول عليها باستخدام بيئة .Matlab-Simulink

الكلمات المفتاحية: التحكم باستخدام الحقل الموجه، محرك تحريضي، نمذجة، تحكم شعاعي.

## Modeling of three-phase induction motor drive system using oriented field

Dr. Mohamed Merhej\*

(Received 7 / 1 / 2015. Accepted 22 / 3 / 2015)

### □ ABSTRACT □

The purpose of research is to build a model of the electric driving system for three-phase squirrel-cage induction motor using oriented electric field method so as to control both the speed , flux and current, ( PI ) controllers was used .

The machine model has been formed based on the equations of the machine written in the stationary coordinates .

To complete the process of control without measuring the rotor flux , a model of flux from the measured values of stator current and rotor speed was build, and it can be measured directly .

**Key words:** field oriented control , induction motor , Simulation, Vector control.

---

\*Assistance professor , Elect. Power Department , Faculty of Mechanical & Electrical Engineering , Tishreen University , Lattakia , Syria.

**مقدمة:**

أكثر من 60% من الطاقة الكهربائية المستهلكة في الدول الصناعية المتقدمة تستهلك في الآلات الكهربائية حيث تقوم الآلة بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية و هذا ما يفسر أهمية الآلات الكهربائية. تمتلك الآلة التحريضية بالمقارنة مع آلة التيار المستمر كثير من الإيجابيات نذكر منها:

- سهولة التصميم و بساطة التركيب.
- عزم دوران كبير.
- سعر منخفض و موثوقية عالية.

من هنا يأتي الاهتمام الكبير بعمل الآلة التحريضية و طرق التحكم بها. مع التزايد الكبير في سرعة الحاسوب الشخصي و بالتالي إمكانية إجراء العمليات الحسابية المعقدة فإن النمذجة والمحاكاة تعد من الوسائل الحديثة المساعدة في عملية التطوير و التحليل بالإضافة إلى القيادة و التحكم بالآلة التحريضية، حيث تختصر الوقت اللازم لبناء أنظمة التحكم بالإضافة إلى توفير المادي الكبير [1].

**أهمية البحث وأهدافه:**

يهدف البحث إلى:

- بناء نموذج الآلة التحريضية ذات الدائر المقصور في الإحداثيات الثابتة.
- بناء النموذج اللازم لحساب فيض الدائر و زاوية دورانه بطريقة سهلة و بسيطة.
- قيادة الآلة التحريضية باستخدام طريقة الحقل الموجه انطلاقاً من نموذج الآلة التحريضية و نموذج الفيض و البرهان على صلاحية كلا النموذجين، حيث تأتي أهمية البحث من خلال النموذج المبسط للآلة و الفيض و سهولة الاستخدام من أجل دارات قيادة متعددة.

**طرائق البحث ومواده:**

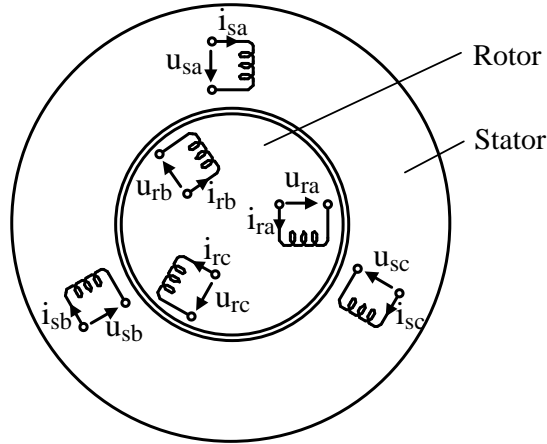
بداية يتم تشكيل الموديل الرياضي للآلة بحيث يمثل جهد الثابت والدائر إشارة الدخل و تيار الثابت والدائر إشارة الخرج للنموذج، بعد ذلك يتم وضع النموذج الرياضي للفيض (بالاعتماد على القيمة المقاسة لتيار الثابت وسرعة الدائر) والمحور الشعاعي اللازمان لعملية قيادة الآلة التحريضية باستخدام الحقل الموجه انطلاقاً من دائرة تحكم خطية (منظم تناسبي تكاملي: PI Controller) تتحكم بكل من:

- سرعة الآلة.
- فيض الدائر.
- المركبة العمودية والأفقية لتيار الثابت.

**إجراء النمذجة:****1 - نموذج الآلة التحريضية ذات الدائر المقصور:**

تتكون الآلة التحريضية (غير المتواقتة) الثلاثية الطور من ملف الثابت ( $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$ ) وملف الدائر ( $u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}$ ) كما يبين الشكل (1). فيما يلي سوف يتم التطرق إلى الآلة التحريضية ثلاثية الطور ذات الدائر

المقصود مع الأخذ بعين الاعتبار أن توتر التغذية خطي و متناظر، و ثابت الآلة أيضاً خطية (لا تتبع إلى درجة الحرارة، منحني المغنطة خطي) [2], [3].

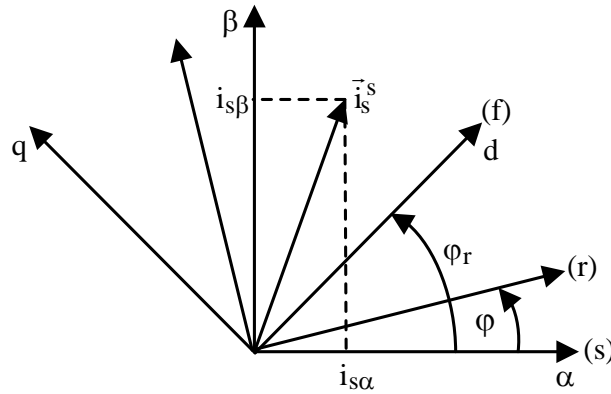


شكل (1): آلة تحريضية ثلاثية الطور

تستخدم عادة ثلاث إحداثيات [2], [4] و ذلك للتعبير عن العلاقات الرياضية التي تصف عمل الآلة كما يبين

الشكل (2):

1. الإحداثيات الثابتة  $(\alpha\beta)$ : يرمز لها بـ  $(s)$ .
2. الإحداثيات الدوارة مع الدائر: يرمز لها بـ  $(r)$ .
3. الإحداثيات الدوارة مع فيض الدائر  $(dq)$ : يرمز لها بـ  $(f)$ .



شكل (2): الإحداثيات الثابتة و الدوارة

معادلات الآلة التحريضية ذات الدائر المقصور في الإحداثيات الثابتة  $(\alpha, \beta)$ :

معادلات الجهد:

$$\bar{u}_s^s = R_s \bar{i}_s^s + \bar{\Psi}_s^s = u_s \alpha + j u_s \beta \quad (1)$$

$$\bar{u}_r^s = R_r \bar{i}_r^s + \bar{\Psi}_r^s - j \omega \bar{\Psi}_r^s = 0 \quad (2)$$

$$\bar{u}_r^r = R_r \bar{i}_r^r + \bar{\Psi}_r^r = 0 \quad (3)$$

حيث

$\bar{u}_s^s, \bar{i}_s^s, \bar{\Psi}_s^s$ : شعاع جهد الثابت، تيار الثابت، فيض الثابت في الإحداثيات الثابتة  $(\alpha, \beta)$ .

$\bar{u}_r^s, \bar{i}_r^s, \bar{\Psi}_r^s$ : شعاع جهد الدائر، تيار الدائر، فيض الدائر في الإحداثيات الثابتة  $(\alpha, \beta)$ .

$\bar{u}_r^r, \bar{i}_r^r, \bar{\Psi}_r^r$ : شعاع جهد الدائر، تيار الدائر، فيض الدائر في الإحداثيات الدوارة  $(r)$ .

$\omega$ : سرعة دوران الدائر الكهريائية،  $R_s$ : مقاومة الثابت،  $R_r$ : مقاومة الدائر.

معادلات الفيض:

$$\bar{\Psi}_s^s = L_s \bar{i}_s^s + L_m \bar{i}_r^s \quad ; \quad L_s = L_m + L_{\sigma s} \quad (4)$$

$$\bar{\Psi}_r^s = L_r \bar{i}_r^s + L_m \bar{i}_s^s \quad ; \quad L_r = L_m + L_{\sigma r} \quad (5)$$

حيث  $L_s$ : التحريضية الذاتية للثابت،  $L_{\sigma s}$ : التحريضية التسريعية للثابت،  $L_r$ : التحريضية الذاتية للدائر،

$L_{\sigma r}$ : التحريضية التسريعية للدائر،  $L_m$ : التحريضية الرئيسية.

معادلة العزم و السرعة:

$$m = \frac{3}{2} p \cdot \text{Im} \left\{ \bar{i}_s^s \cdot \bar{\Psi}_s^{s*} \right\} \quad (6)$$

$$\omega = p \cdot \omega_m = \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

$$\varphi = p \cdot \varphi_m \quad (8)$$

$$m - m_L = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (9)$$

حيث  $\omega_m$ : السرعة الميكانيكية،  $\varphi_m$ : الزاوية الميكانيكية،  $\varphi$ : الزاوية الكهريائية،  $m$ : عزم الآلة،  $m_L$ : عزم

الحمولة،  $J$ : ثابت العطالة،  $p$ : عدد أزواج الأقطاب.

تشكيل النموذج الرياضي للآلة التحريضية ذات الدائر المقصور في الإحداثيات الثابتة  $(\alpha\beta)$ :

تستند فكرة بناء نموذج الآلة التحريضية على أن إشارة الدخل تمثل الجهد (جهد الثابت و جهد الدائر)، أما إشارة الخرج فتتمثل التيار (تيار الثابت و تيار الدائر) [2]، لذلك لا بد من إيجاد علاقة تيار الثابت و الدائر بدلالة ثوابت الدارة حيث سيتم بناء نموذج الآلة في الإحداثيات الثابتة  $(\alpha\beta)$ . نعيد كتابة معادلات الجهد (1، 2، 3) كما يلي:

$$\vec{\Psi}_s^s = \vec{u}_s^s - R_s \vec{i}_s^s \quad (10)$$

$$\vec{\Psi}_r^s = \vec{u}_r^s - R_r \vec{i}_r^s + j\omega \vec{\Psi}_r^s \quad ; \vec{u}_r^s = 0 \quad (11)$$

$$\vec{\Psi}_r^r = \vec{u}_r^r - R_r \vec{i}_r^r \quad ; \vec{u}_r^r = 0 \quad (12)$$

بتقسيم المعادلة (4) على  $L_m$  و المعادلة (5) على  $L_r$  نجد:

$$\frac{\vec{\Psi}_s^s}{L_m} = \frac{L_s}{L_m} \cdot \vec{i}_s^s + \vec{i}_r^s \quad (13)$$

$$\frac{\vec{\Psi}_r^s}{L_r} = \frac{L_m}{L_r} \cdot \vec{i}_s^s + \vec{i}_r^s \quad (14)$$

ب طرح المعادلة (13) من المعادلة (14) و بعد الإصلاح نجد:

$$\vec{i}_s^s = \left( \frac{\vec{\Psi}_r^s}{L_m} - \frac{\vec{\Psi}_r^s}{L_r} \right) \cdot \frac{L_r \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \quad (15)$$

بتقسيم المعادلة (4) على  $L_s$  و المعادلة (5) على  $L_m$  نجد:

$$\frac{\vec{\Psi}_s^s}{L_s} = \vec{i}_s^s + \frac{L_m}{L_s} \vec{i}_r^s \quad (16)$$

$$\frac{\vec{\Psi}_r^s}{L_m} = \vec{i}_s^s + \frac{L_r}{L_m} \vec{i}_r^s \quad (17)$$

ب طرح المعادلة (16) من المعادلة (17) و بعد الإصلاح نجد:

$$\vec{i}_r^s = \left( \frac{\vec{\Psi}_r^s}{L_m} - \frac{\vec{\Psi}_s^s}{L_s} \right) \cdot \frac{L_s \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \quad (18)$$

لدينا:

$$\frac{\vec{\Psi}_s^s}{L_m} = \vec{i}_{\mu s}^s \quad (19)$$

$$\frac{\vec{\Psi}_r^s}{L_m} = \vec{i}_{\mu r}^s \quad (20)$$

$$\frac{\bar{\Psi}_s^s}{L_s} = \frac{\bar{\Psi}_s^s}{L_s} \cdot \frac{L_m}{L_m} = \bar{i}_{\mu s}^s \frac{L_m}{L_s} \quad (21)$$

$$\frac{\bar{\Psi}_r^s}{L_r} = \frac{\bar{\Psi}_r^s}{L_r} \cdot \frac{L_m}{L_m} = \bar{i}_{\mu r}^s \frac{L_m}{L_r} \quad (22)$$

حيث:

$\bar{i}_{\mu s}^s$  تيار المغنطة لملف الثابت في الإحداثيات الثابتة.

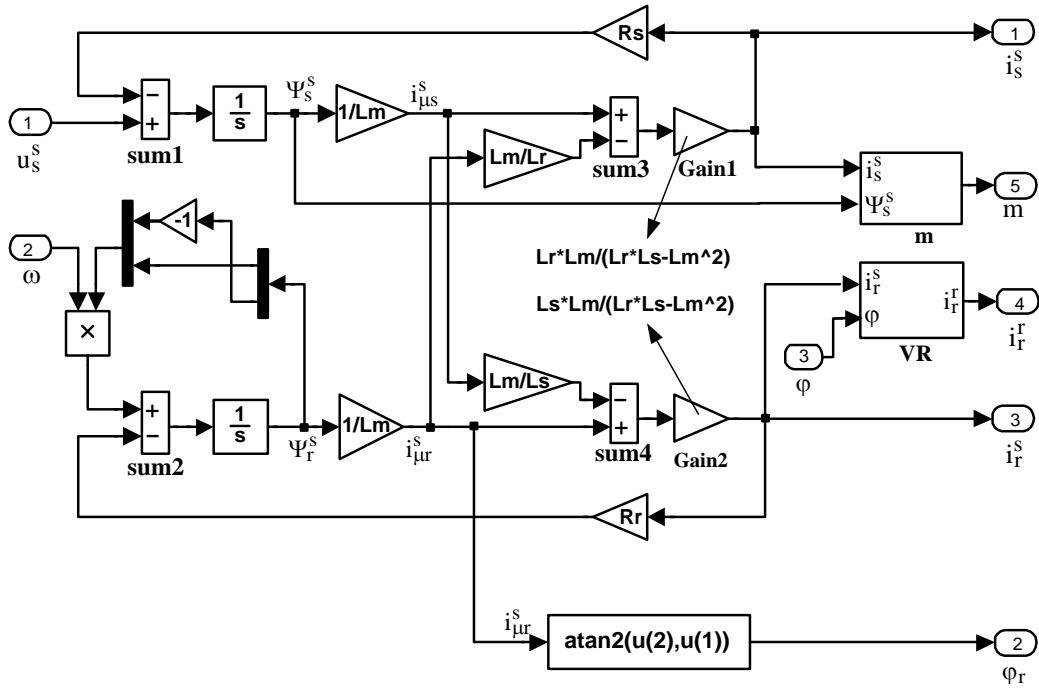
$\bar{i}_{\mu r}^s$  تيار المغنطة لملف الدائر في الإحداثيات الثابتة.

بتعويض المعادلات (19 حتى 22) بالمعادلتين (15) و (18) نجد:

$$\bar{i}_s^s = (\bar{i}_{\mu s}^s - \bar{i}_{\mu r}^s \frac{L_m}{L_r}) \cdot \frac{L_r \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \quad (23)$$

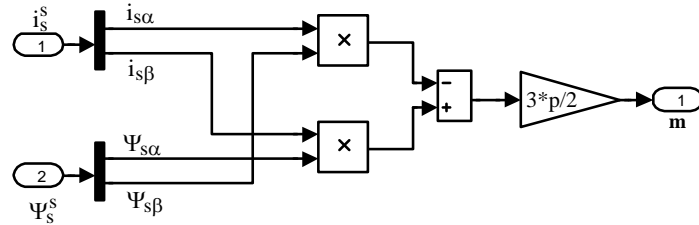
$$\bar{i}_r^s = (\bar{i}_{\mu r}^s - \bar{i}_{\mu s}^s \frac{L_m}{L_s}) \cdot \frac{L_s \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \quad (24)$$

بالاعتماد على المعادلات من (10) حتى (24) يتم بناء الجزء الكهربائي للنموذج (ele.part) المبين بالشكل (3): من خلال عنصري الجمع sum1 و sum2 يتم تشكيل معادلتَي الجهد (10) و (11)، أما عنصري الجمع sum3 و sum4 و عنصري الريح Gain1 و Gain2 فتتحقق معادلتَي التيار (23) و (24). يتم تشكيل عزم الآلة m في المعادلة (6) من خلال العنصر m (Subsystem) والموضح بالشكل (4). يقوم محول بارك الشعاعي (Vector Roteter: VR) و المبين بالشكل (5) بتحويل تيار الدائر  $\bar{i}_r^s$  من الإحداثيات الثابتة إلى الإحداثيات الدوارة مع الدائر:  $\bar{i}_r^r = \bar{i}_r^s e^{-j\varphi}$ . تُمكن المعادلة (9) من بناء الجزء الميكانيكي لنموذج الآلة (mech.part) و المبين بالشكل (6). الشكل (7) يبين الدارة الكاملة للنموذج بعد وضع كل من الجزء الكهربائي و الميكانيكي بـ Subsystem و من ثم وضع الجزئين معاً بـ Subsystem تحت اسم ASM-Model كما في الشكل (8).

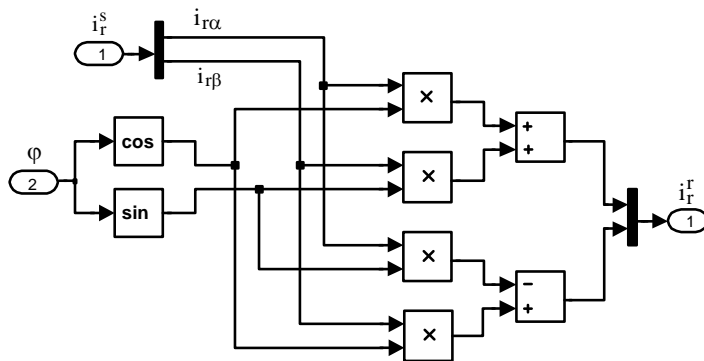


شكل (3): الجزء الكهربائي لنموذج الآلة التحريضية

**ملاحظة:** تمثل الزاوية  $\varphi_r$  زاوية دوران شعاع تيار المغنطة لملف الدائر (شعاع فيض الدائر) و الذي ينطبق على المحور الأفقي للإحداثيات (dq) كما يبين الشكل (2).

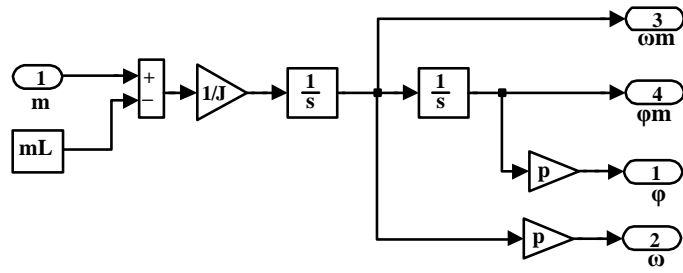


شكل (4): تشكيل عزم الآلة

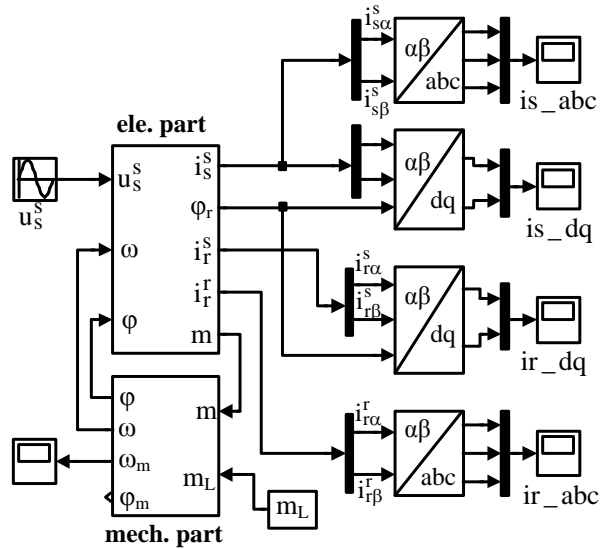


شكل (5): تحويل تيار الدائر من الإحداثيات الثابتة إلى الدائرة مع الدائر

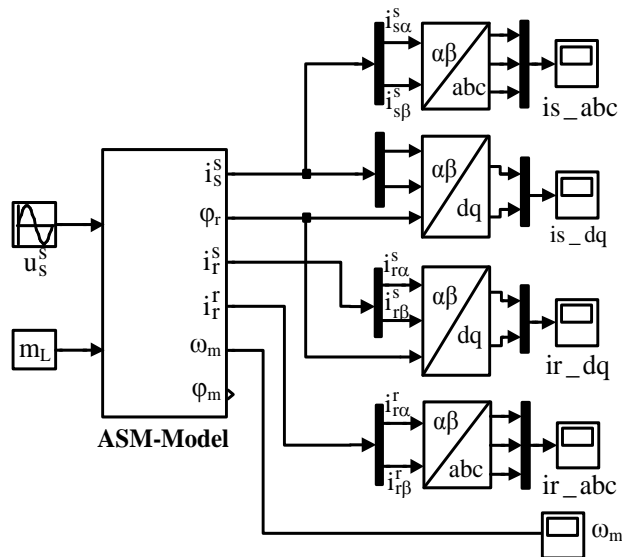




شكل (6): تشكيل السرعة



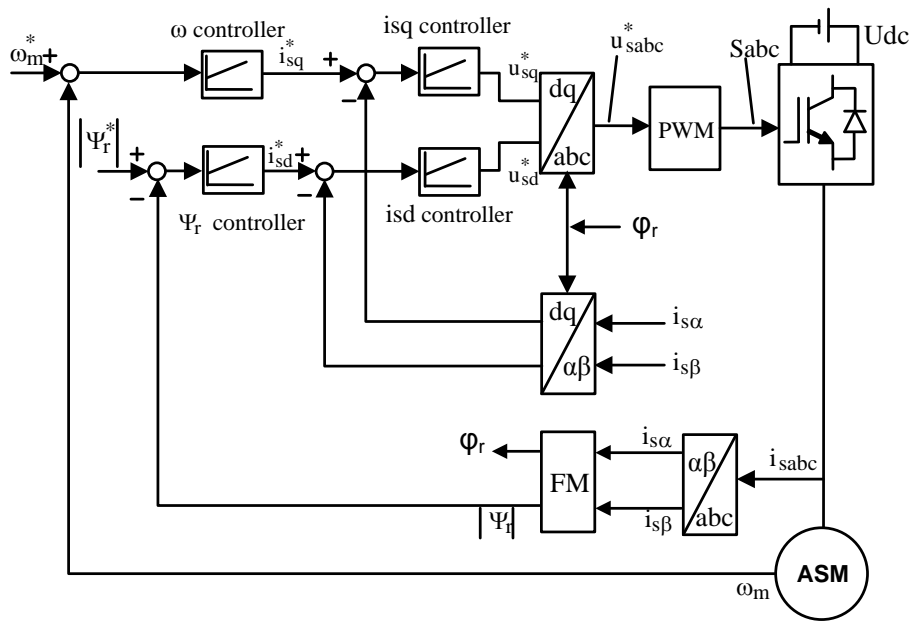
شكل (7): الجزء الكهربائي و الميكانيكي لنموذج الـ ASM



شكل (8): الجزء الكهربائي و الميكانيكي لنموذج الـ ASM

## 2- طريقة التحكم الموجه:

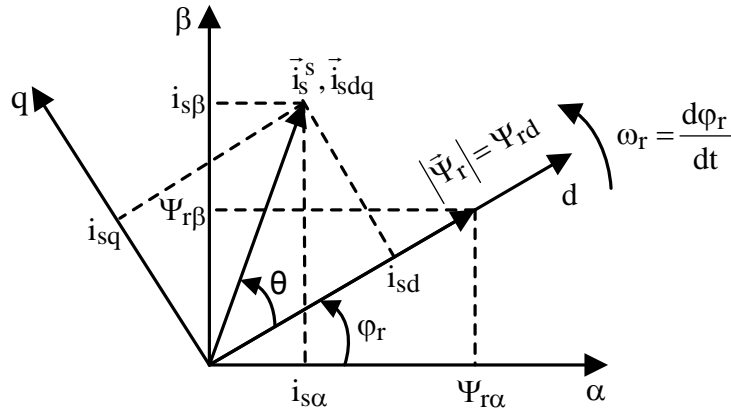
يمثل الشكل (9) المخطط الصندوقي لدارة التحكم بالآلة التحريضية باستخدام الحقل الموجه لفيض الدائر. لتطبيق طريقة التحكم المذكورة تم استخدام أربع منظمات تناسبية تكاملية [6], [5] لتنظيم كل من مركبتي التيار  $i_{sd}$  و  $i_{sq}$ ، فيض الدائر  $\Psi_r$  و السرعة  $\omega_m$ . من خلال تنظيم السرعة و الفيض نحصل على القيمة المرجعية للمركبة العمودية و الأفقية للتيار  $(i_{sd}^*, i_{sq}^*)$  و من خلال تنظيم مركبتي التيار نحصل على الجهد المرجعي  $(u_{sd}^*, u_{sq}^*)$  الذي يتم تحويله إلى الإشارة المرجعية الثلاثية الطور  $u_{sabc}^*$  و ذلك من خلال المحول الشعاعي  $(dq \text{ to } abc)$ . يؤمن مولد النبضات PWM تشكيل نبضات التحكم للقالبة عن طريق مقارنة إشارة الدخل المرجعية  $u_{sabc}^*$  مع إشارة مثبته [7].



شكل (9): دارة التحكم

## 3- نموذج الفيض:

من المخطط الصندوقي لدارة التحكم بالآلة شكل (9) لا بد من حساب كل من فيض الدائر  $|\Psi_r|$  و زاوية دورانه  $\varphi_r$  في الإحداثيات الدوارة  $(dq)$  و ذلك لإتمام عملية التحكم بالآلة، حيث يبين الشكل (10) شعاع فيض الدائر و تيار الثابت في الإحداثيات الثابتة و الدوارة [2].



شكل (10): المخطط الشعاعي

من خلال قياس تيار الثابت للآلة  $i_{sabc}$  و تحويله إلى الإحداثيات الثابتة  $(\alpha\beta)$  و قياس السرعة  $\omega_m$  كما يبين الشكل (9) يمكن تشكيل نموذج فيض الدائر (Flux Model: FM)، أي حساب مطال فيض الدائر  $|\bar{\Psi}_r|$  و زاوية دورانه  $\varphi_r$  كما يلي:

نعيد كتابة المعادلتين (5) و (2) كما يلي:

$$\bar{\Psi}_r^s = L_r \bar{i}_r^s + L_m \bar{i}_s^s \Rightarrow \bar{i}_r^s = (\bar{\Psi}_r^s - L_m \bar{i}_s^s) \cdot \frac{1}{L_r} \quad (25)$$

$$\bar{u}_r^s = R_r \bar{i}_r^s + \dot{\bar{\Psi}}_r^s - j\omega \bar{\Psi}_r^s = 0 \Rightarrow \dot{\bar{\Psi}}_r^s = -R_r \bar{i}_r^s + j\omega \bar{\Psi}_r^s \quad (26)$$

بتعويض العلاقة (25) بالعلاقة (26) نجد:

$$\dot{\bar{\Psi}}_r^s = -\frac{R_r}{L_r} (\bar{\Psi}_r^s - L_m \bar{i}_s^s) + j\omega \bar{\Psi}_r^s \quad (27)$$

بفصل المركبة الحقيقية عن التخيلية نجد:

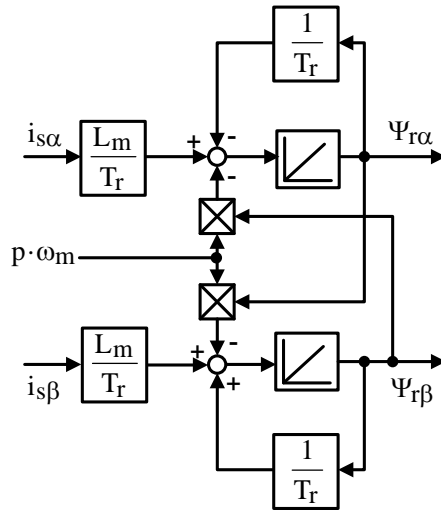
$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\alpha} - \omega \cdot \Psi_{r\beta} + \frac{R_r}{L_r} \cdot L_m i_{s\alpha} \quad (28)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\beta} - \omega \cdot \Psi_{r\alpha} + \frac{R_r}{L_r} \cdot L_m i_{s\beta} \quad (29)$$

بالاعتماد على المعالنتين (28) و (29) نحصل على المخطط الصندوقي لنموذج فيض الدائر كما في

الشكل (11) الذي يمثل خرجه مركبتي فيض الدائر في الإحداثيات الثابتة حيث لدينا:

$$|\bar{\Psi}_r| = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2} \quad , \quad \tan \varphi_r = \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}} \quad , \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (30)$$

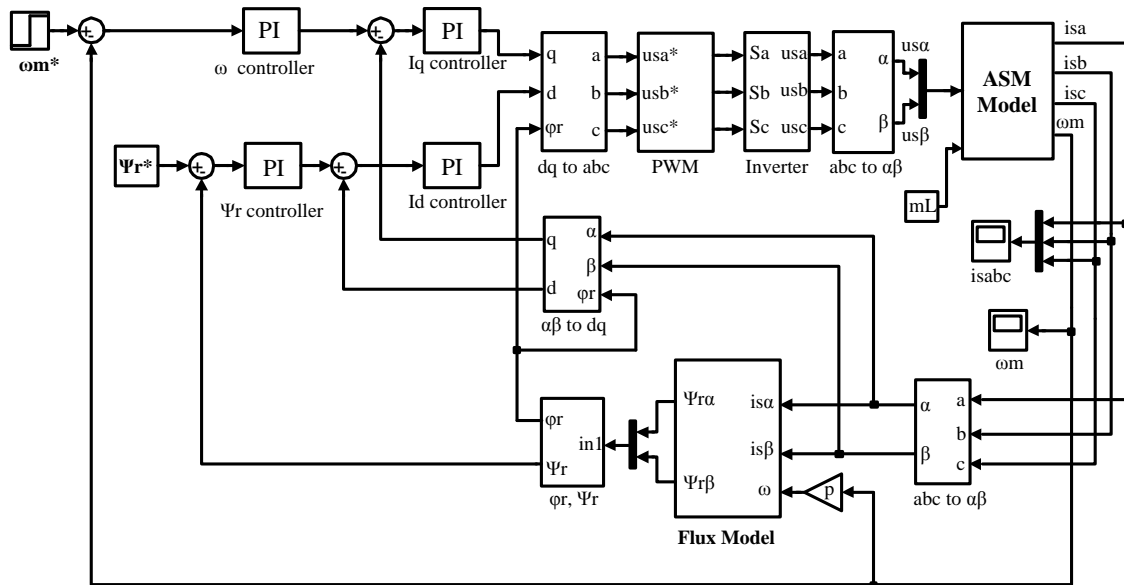


شكل (11): تشكيل فيض الدائر

#### 4- نمذجة و محاكاة دائرة التحكم:

يبين الشكل (12) نموذج دائرة التحكم بالآلة التحريضية باستخدام الحقل الموجه باتجاه فيض الدائر باستخدام

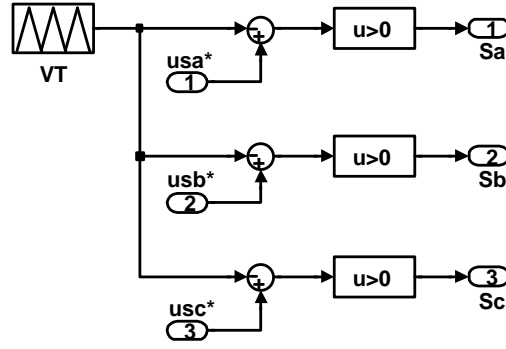
البرنامج MATLAB/SIMULINK .



شكل (12): نموذج دائرة التحكم بالآلة التحريضية

تتكون الدارة المبينة بالشكل (12) بشكل أساسي من العناصر التالية:

1. نموذج الآلة التحريضية (ASM Model): يتم استخدام نموذج الآلة التحريضية المبين بالشكل (8).
2. نموذج مولد النبضات (PWM): يتم بناء نموذج مولد النبضات بالاعتماد على مقارنة إشارة مثلثية VT بتردد 2.5KHz مع الإشارة المرجعية الجيبية ثلاثية الطور  $us_{abc}^*$  كما في الشكل (13) [7].



شكل (13): نموذج مولد النبضات

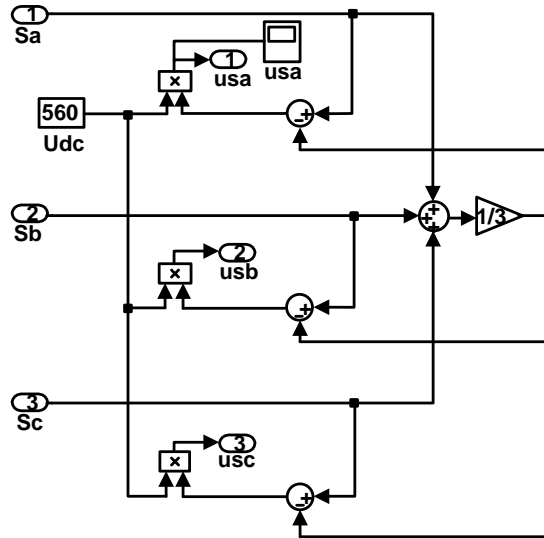
3. نموذج القالبية الجسرية (Inverter): يعطى جهد خرج القالبية الجسرية بالعلاقة التالية:

$$u_{sa} = \left[ S_a - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] U_{dc} = f_a \cdot U_{dc}$$

$$u_{sb} = \left[ S_b - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] U_{dc} = f_b \cdot U_{dc} \quad (31)$$

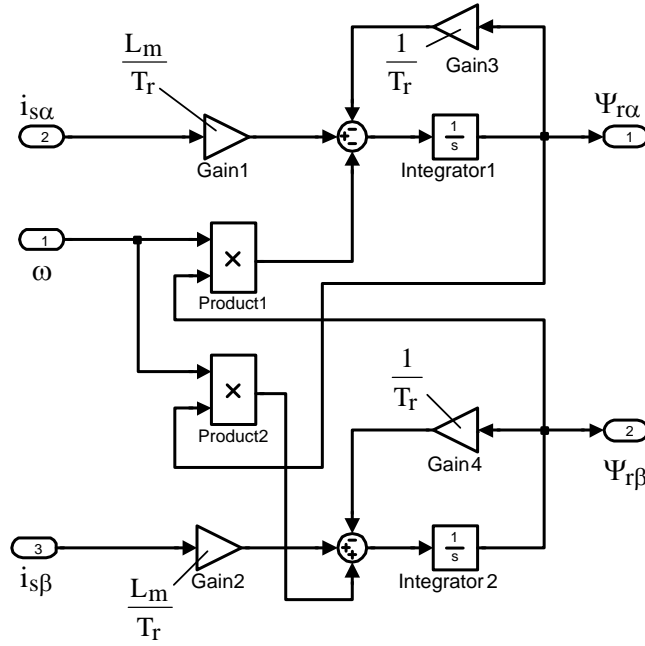
$$u_{sc} = \left[ S_c - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] U_{dc} = f_c \cdot U_{dc}$$

حيث  $S_a, S_b, S_c$ : تمثل نبضات التحكم للقالبية الجسرية و التي تأخذ القيمة 0 أو 1،  $U_{dc} = 560V$ : يمثل جهد الدخل للقالبية الجسرية. الشكل (14) يمثل نموذج القالبية الجسرية الثلاثية الطور التي تم تشكيلها اعتماداً على العلاقة (31).



شكل (14): نموذج القالبية الجسرية الثلاثية الطور

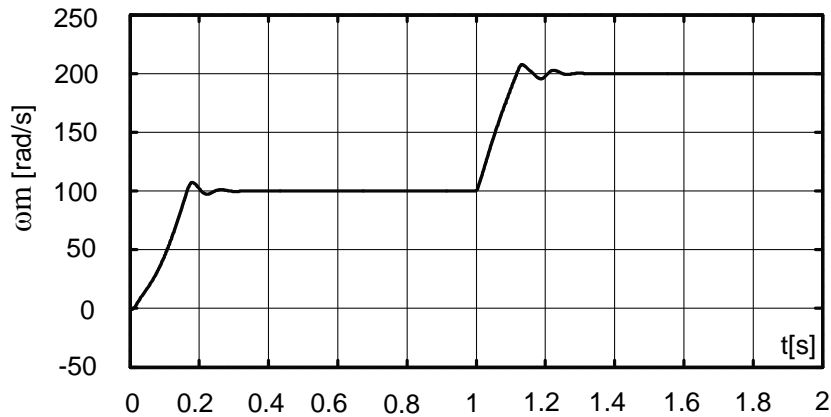
4. نموذج فيض الدائر (FM): انطلاقاً من المخطط الصندوقي لفيض الدائر المبين بالشكل (11) يتم تشكيل دائرة نموذج الفيض كما يبين الشكل (15)، أما مطال فيض الدائر (القيمة المطلقة) و زاوية دورانه فيتم تشكيلها اعتماداً على المعادلة (30).



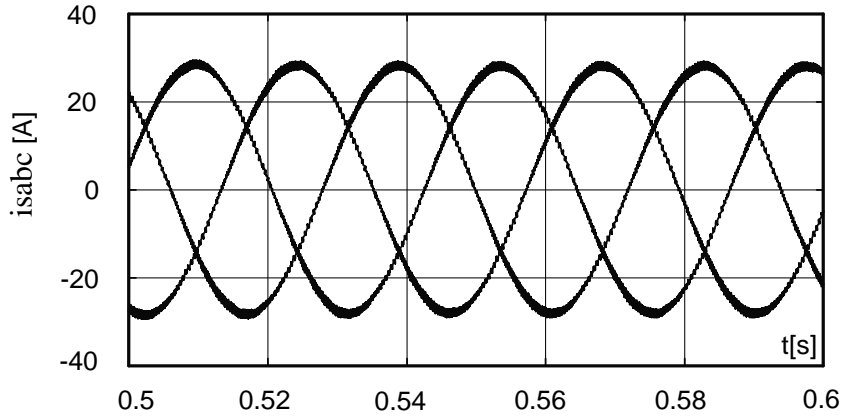
شكل (15): نموذج فيض الدائر

### النتائج والمناقشة:

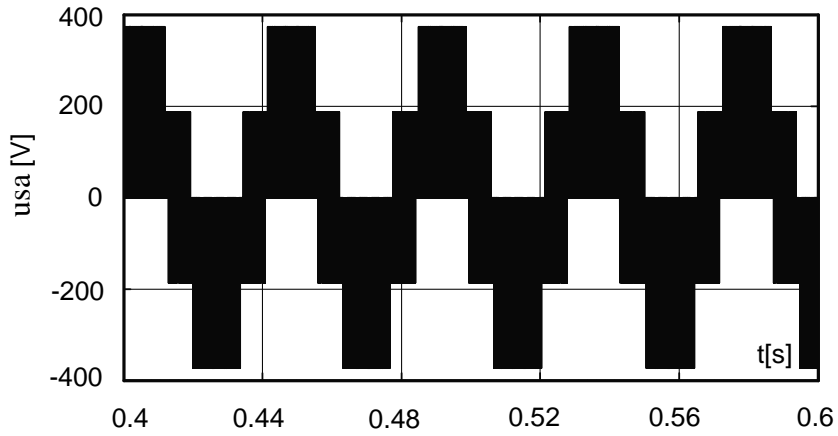
نتائج المحاكاة من أجل حمولة ثابتة: تبين الأشكال من (16) حتى (18) نتائج المحاكاة لكل من سرعة الدائر، تيار الثابت والجهد الطوري للقالبة عند السرعة المرجعية  $\omega_m^* = [100 \text{ rad/s}, 200 \text{ rad/s}]$  وحمولة  $m_L^*$  ثابتة. كما نلاحظ من منحنى السرعة أن هناك تطابق بين القيمة المرجعية  $\omega_m^*$  و القيمة المقاسة  $\omega_m$ ، أما جهد القالبة الطوري  $u_{sa}$  فيأخذ القيم:  $\left( \pm \frac{1}{3} U_{dc}, 0, \pm \frac{2}{3} U_{dc} \right)$  التي تتوافق مع المعادلة (31).



شكل (16): سرعة الدائر

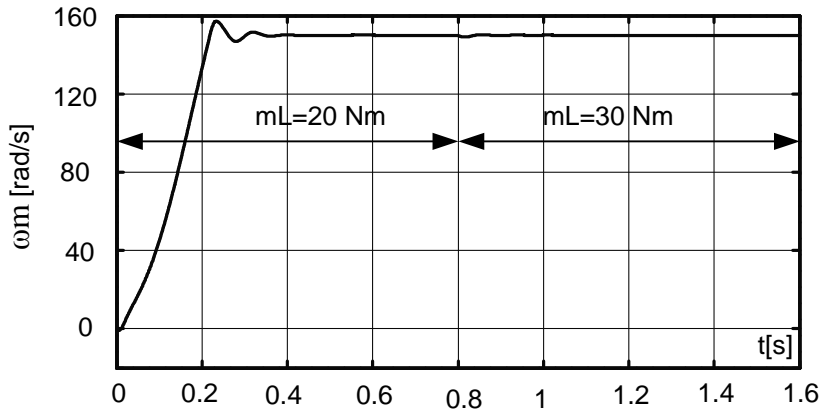


شكل (17): تيار الثابت

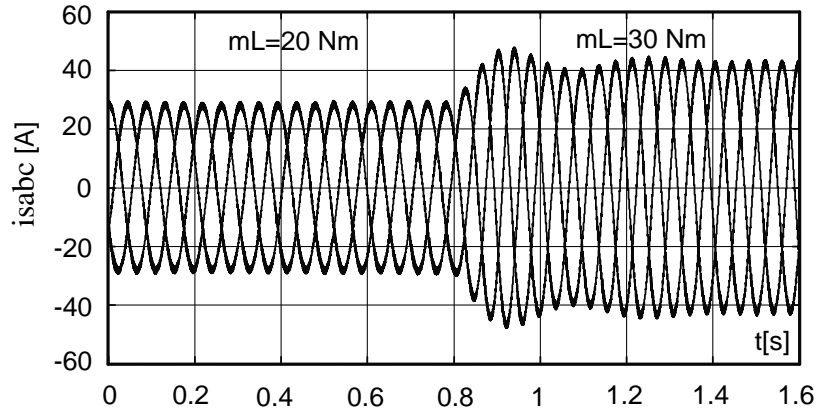


شكل (18): جهد القالبية الطوري

نتائج المحاكاة من أجل حمولة متغيرة: يبين الشكلان (19) و (20) سرعة الدائر وتيار الثابت من أجل سرعة مرجعية ثابتة  $\omega_m^* = 150$  [rad/s] وحمولة متغيرة  $m_L^* = [20\text{Nm}, 30\text{Nm}]$ ، حيث نلاحظ ثبات السرعة عند تغير الحمولة.



شكل (19): منحنى السرعة من أجل حمولة متغيرة



شكل (20): تيار الحمولة من أجل قيمتين للحمولة

### الاستنتاجات والتوصيات:

1. من خلال كتابة معادلات الآلة التحريضية في الإحداثيات الثابتة الثنائية نحصل على دارة النموذج بشكل مبسط و بعدد قليل من العناصر.
2. إن استخدام نموذج رياضي للفيض من أجل حساب فيض الدائر و زاوية دورانها عن طريق قياس تيار الثابت و سرعة الدائر تُغني عن قياس فيض الدائر بشكل مباشر الذي ترافقه صعوبات كثيرة.
3. من خلال استخدام طريقة الحقل الموجه للقيادة و التحكم بالآلة التحريضية (الفصل بين دارتي التحكم بالفيض و العزم) تم إثبات (كما تبين النتائج) صلاحية كل من نموذج الآلة و نموذج الفيض المقترحين.

### المراجع:

- [1] Jaeger, R., Stein, E. *Uebungen zur Leistungselektronik* VDE, Germany, 2001, 296.
- [2] SCHROEDER, D. *Elektrische Antriebe Regelung von Antriebssystemen*. 3 Auflage, Springer, Deutschland, 2008, 1336.
- [3] Michalke, G. *Variable Speed Wind Turbines- Modelling Control and Impact on Power Systemes*. PhD, Germany, 2008, 211.
- [4] Quang, N.P., Dittrich, J.-A. *Vector control of Three Phase AC Machines*. Springer, Germany, 2008, 340.
- [5] Serba, L. *Current Control Strategies for Multilevel Grid Connected Inverters*. PhD, SWISS, 2007, 296.
- [6] Zacher, S., *Uebungsbuch Regelungstechnik*. 3. Auflage, Viewef, Deutschland, 2007, 262.
- [7] Schulz, D. *Netzrueckwirkungen- Theorie, Simulation, Messung und Bewertung*. 1 Auflage, VDE, Deutschland, 2004, 216.